

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение предприятия по рециклингу стекольной продукции

Студент

А.Д. Костюхин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., А.Н. Черненко

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Аннотация

В выпускной квалификационной работе (ВКР) было рассмотрено электроснабжение предприятия по рециклингу стекольной продукции.

При выполнении работы была дана краткая характеристика производства и определены требования к системе электроснабжения предприятия.

Произведен расчет ожидаемых электрических нагрузок от силовых электроприемников по методу расчетного коэффициента. Определены нагрузки осветительной сети и выбран тип и необходимое количество светильников для обеспечения требуемой освещенности.

Произведен расчет необходимого количества трансформаторов, их мощности и типа для установки на трансформаторной подстанции, определена потребность в компенсации реактивной мощности.

Произведен расчет токов короткого замыкания в сети предприятия и выбраны аппараты защиты.

Выполнен выбор и проверка кабелей для построения распределительной внутрицеховой сети.

Определены параметры системы заземления подстанции предприятия.

Выпускная квалификационная работа состоит из 58 страниц, 3 рисунков, 5 таблиц, 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика производственного участка, требования к электроснабжению	6
2 Расчет электрических нагрузок	11
2.1 Расчет силовой нагрузки распределительного шинпровода ШРА №2	13
2.2 Расчет силовой нагрузки магистрального шинпровода ШМА	16
2.3 Расчет осветительной нагрузки	19
2.4 Электрический расчет осветительной сети	25
2.5 Компенсация реактивной мощности.....	27
2.6 Выбор числа и мощности трансформаторов	28
2.7 Расчет и выбор аппаратов защиты	34
2.8 Расчет токов короткого замыкания	36
2.9 Выбор высоковольтного кабеля	49
2.10 Выбор высоковольтных выключателей, разъединителей, трансформаторов тока	51
2.11 Расчет заземления трансформаторной подстанции.....	52
Заключение	56
Список используемых источников.....	57

Введение

«В настоящий момент большим спросом пользуются различные изделия из стекломатериалов. Технологии позволяют изготавливать большое разнообразие предметов всех цветов и форм, открывая широкие возможности для дизайнеров и деятелей искусства. По-прежнему большую долю рынка потребления стекольной продукции составляют предприятия, производящие алкогольные и безалкогольные напитки. Производители посуды, металлопластиковых окон, мебельная индустрия – источники постоянного и стабильного спроса на стекло. Именно наличие такого большого количества потенциальных потребителей делает стекольный бизнес привлекательным для капиталовложений» [1].



Рисунок 1 – Система переработки тары

Наибольшей популярностью и широтой потребления обладают листы стекла, которые кроме прочего еще и являются более простыми в

изготовлении. При организации производства необходимо тщательное планирование всех этапов для того, чтобы конечный результат удовлетворял требованиям, необходимым широкому кругу потребителей:

- прозрачность готового стекла должна быть не ниже 84–87%;
- в готовом продукте возможно незначительное количество воздушных пузырьков, песчинок и т.д.;
- закалка стекла должна обеспечивать его прочностные характеристики (нагрузка до разрушения не ниже 250 МПа);
- устойчивость к температурным воздействиям до 1750°С.

Переработка стекла может быть разделена на следующие основные этапы:

- сборка боя стекла, банок и любой стеклянной продукции, предназначенной для утилизации;
- отделение мусора от стекла и просеивание;
- комплектация специальной установкой для определения цвета подаваемого стекла позволит получить продукцию более высокого качества и однородности;
- сбор из боя стекла металлических включений при помощи магнитной установки;
- промывка;
- осушение;
- раздробление.

Целью работы является разработка надежной системы электроснабжения предприятия по рециклингу стекольной продукции.

1 Характеристика производственного участка, требования к электроснабжению

«Электроснабжение промышленных предприятий строится на основе питающих, распределительных, трансформаторных, преобразовательных подстанций, а также на связывающих их кабельных, воздушных сетях, токопроводов (низкого и высокого напряжения). Проектирование электроснабжения промышленных предприятий должно происходить с учетом важнейших требований, определяющих: надежность; удобство; безопасность; обеспечение необходимого количества/качества энергии; бесперебойность снабжения электрической энергии в обычном режиме и послеаварийном; экономичность по затратам энергии, материалов и оборудования. Соблюдать вышеперечисленные требования возможно при использовании взаимного резервирования путей предприятия и сплочения питания промышленных и коммунальных (а также сельских) потребителей. В момент сооружения на предприятии собственной электрической станции необходимо учесть близлежащие потребители энергии (внезаводские)» [3].

Приемники, обеспечивающие электроснабжение промышленных объектов. Так как электросети и подстанции являются элементами общей структуры предприятия, они должны координироваться с технологическими, строительными частями, а также с планом здания. К примеру, высокие требования к надежному и качественному электроснабжению предъявляются крупными предприятиями цветной и черной металлургии. Они отличаются высокими значениями суммарных установленных мощностей электрических приемников, которые могут достигать 1700-2000 МВт. Электроприемники можно разделить на 3 категории:

«1. Электроприемники, которые вследствие перерывов в электроснабжении могут проявить опасность для людей, нанести ущерб оборудованию, продукции и т. д. Такие приемники должны питаться от двух отдельных источников. Перерыв электроснабжения возможен только на

период автоматического включения резерва. Примеры: котельные производственного пара, доменные цехи, приводы вагранок, ответственные насосные, разливочные краны и др.

2. Электроприемники, перерыв в работе которых связан с недоотпуском продукции, простое рабочих, механизмов, транспорта. Допустимы перерывы питания на время, которое необходимо для ручного включения резерва.

3. Прочие электроприемники, которым позволен перерыв электроснабжения на время ремонта (не более одних суток). Например, вспомогательные цеха, неответственные склады, цеха несерийного производства и др» [3].

«Для того чтобы правильно решать вопросы надежности, нужно точно установить режимы, которые возникают при аварии и после нее. Аварийный режим – временный режим, возникающий из-за нарушения приемлемой работы системы электроснабжения или ее отдельных элементов. Послеаварийный режим – режим после ликвидации аварии, который длится до полного восстановления нормальной работы. Очевидно, что система электроснабжения должна строиться так, чтобы при послеаварийном режиме она смогла обеспечить функционирование главных производств промышленного предприятия (после необходимых пересоединений). При послеаварийном режиме допускаются перебои в подаче электроэнергии приемниками третьей и отчасти второй категорий на небольшое время.

Напряжение, подходящее для того или иного предприятия, зависит от: потребляемой мощности предприятием; промежутком от предприятия до источника; значения номинального напряжения, при котором может производиться питание.

К примеру, для напряжения 20 кВт применяются более легкие, экономичные аппараты, чем для 35 кВт. Годовые расходы при использовании такого напряжения значительно уменьшаются. Но, как уже было сказано выше, напряжение 20 кВт не подойдет для большого промышленного предприятия. На второй и следующих ступенях распределения

электроэнергии на больших и средних заводах может применяться напряжение 10 (6) кВ. Что касается первой ступени, то на крупных предприятиях такое напряжение возможно при использовании токопроводов.

Напряжение 3 кВ не применяется в качестве основного напряжения распределительной сети. Его использование может быть задействовано для действующих электрических установок до реконструкции.

Другие напряжения применяются:

- для электроустановок до 1000 В – напряжение 380-220 В;
- на реконструируемых промышленных предприятиях – напряжение 220-127 В (довольно редко);
- в помещении с высокой опасностью – 36 В;
- для питания переносных ламп – напряжение до 12 В;
- на химических, нефтехимических промышленных предприятиях – 660 В (довольно редко)» [3].

Основные электрооборудования цеха производству стекла (таблица 1) относятся ко 2-ой категории надежности электроснабжения, поэтому требуется двухтрансформаторная подстанция.

Цех предназначен для производства, обработки и упаковки готового листового стекла и зеркальных изделий, так же цех оборудован стеллажами для временного хранения заготовок. Стены, потолок, колонны окрашены светлой краской для лучшего отражения света. Источником света в цехе является только искусственное освещение.

Цех имеет следующие габаритные размеры:

- ширина $A = 32$ метров;
- длина $B = 48$ метров;
- высота $H = 10$ метров.

Таблица 1 - Перечень оборудования участка производства стекла

Позиция	Название оборудования	Мощность кВт	Кол-во
1	2	3	4
1	Тележка придаточная рельсовая	5	1
2	Стол для обработки стекла аммиачно- Меловым раствором	3	1
3	Стеллаж-передвижной ааккумуляторный	3	9
4	Установка вакуумная металлизационная для нанесения зеркального покрытия на стекло	50	2
5	Насос-вакуумный	17	2
6	Накопитель для стекла с нанесённой амальгамой	2	2
7	Машина лаколивная	3	1
8	Конвекционная сушильная камера	47,2	1
9	Накопитель для стекла и зеркал для последующего раскроя	1,2	9
10	Стеллаж двухсторонний для хранения неиспользуемого стекла	3	4
11	Стол раскроя стекла и зеркал	5,3	3
12	Станок обработки торцевых сторон изделий	5	2
13	Стеллаж кассетного типа для сушки изделий (ребровой)	13	2
14	Линия обработки прямых кромок	10,3	1
15	Станок сверлильный	4	1
16	Стеллаж-накопитель для обработанных изделий	1,2	5
17	Накопитель для обработки листового стекла	1,2	15

Продолжение таблицы 1

18	Пескоструйный аппарат для обработки листового стекла	53	1
19	Стол склейки и упаковки готовой продукции	3	2
20	Конвейер подвесной	1	37
21	Печь индукционная	2	40
22	Роботизированная техника	6	5

В разделе приведены габаритные характеристики производственного цеха, номинальные нагрузки планируемых к установке технологических электроприемников. Выполнен обзор используемых в сегодняшней практике схем внутрицехового промышленного электроснабжения.

2 Расчет электрических нагрузок

«Расчет электрических нагрузок - наиболее ответственный расчет, выполняемый при проектировании системы электроснабжения каждого предприятия любой отрасли народного хозяйства. Завышение нагрузки может привести к перерасходу проводникового материала, удорожанию строительства» [3].

На основании расчетов электрических нагрузок производится выбор основных элементов электрической сети.

Расчет электрических нагрузок показан на примере распределительного шинпровода ШРА-2.

Таблица 2- Перечень оборудования распределительного шинпровода ШРА 2

Позиция оборудования	Наименование электроприемников	Количество электроприемников	Единичная мощность электроприемников	Коэффициент использования	Коэффициент мощности, тангенс потерь
		n, шт	P, кВт	$K_{и}$	$\cos\phi/tg\phi$
1	2	3	4	5	6
03	Стеллаж передвижной аккумуляторный	3	3	0,3	0,4/2,29
04	Установка вакуумная металлизационная для нанесения зеркального покрытия на стекло	1	50	0,2	0,65/,16
06	Накопитель для стекла с нанесённой амальгамой	2	2	0,25	0,4/2,29
08	Конвекционная сушильная камера	1	47,2	0,6	0,95/0,32

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
012	Станок обработки торцевых сторон изделия	2	5	0,25	0,52/1,64
013	Стеллаж кассетного типа для сушки изделий	2	13	0,25	0,4/2,29
014	Линия обработки прямых кромок	1	10,3	0,25	0,52/1,64
015	Станок сверлильный	1	4	0,4	0,65/1,16
016	Стеллаж-накопительный для обработанных изделий	5	1,2	0,25	0,4/2,29
017	Накопитель для обработки листового стекла	5	1,2	0,25	0,4/2,29
019	Стол склейки и упаковки готовой продукции	2	3	0,25	0,52/1,64
022	Роботизированная техника	2	5	0,5	0,8/0,75

- номинальная мощность группы электроприёмников $P_{ном.уст012}$, кВт

$$P_{ном.уст012} = n \cdot P_{ном012} \quad (1)$$

где n - количество электроприёмников в группе, шт [5]

$$P_{ном.уст012} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ кВт}$$

- среднесменная активная мощность $P_{см012}$, кВт

$$P_{см012} = P_{ном.уст012} \cdot K_{II} \quad (2)$$

$$P_{см012} = 10 \cdot 0,25 = 2,5 \text{ кВт}$$

- среднесменная реактивная мощность $Q_{см012}$, кВАр

$$Q_{см012} = P_{см012} \cdot tg\phi \quad (3)$$

$$Q_{см012} = 2,5 \cdot 1,64 = 4,1 \text{ кВАр}$$

2.1 Расчет силовой нагрузки распределительного шинпровода ШРА №2

- номинальная мощность электроприёмников $P_{ШРА2}$, кВт [9]

$$P_{ном.ШРА2} = \sum_1^n P_{ном.зр} \quad (4)$$

$$P_{ном.ШРА2} = 9 + 50 + 4 + 47,2 + 10 + 26 + 10,3 + 4 + 6 + 6 + 6 + 10 = 188,5 \text{ кВт}$$

- среднесменная активная мощность $P_{смШРА2}$, кВт

$$P_{см.ШРА2} = \sum_1^n P_{см.зр} \quad (5)$$

$$P_{см.ШРА2} = 2,7 + 10 + 1 + 28,32 + 2,5 + 6,5 + 2,57 + 1,6 + 1,5 + 1,5 + 1,5 + 5 = 64,69 \text{ кВт}$$

- среднесменная реактивная мощность $Q_{см.ШРА2}$, кВАр

$$Q_{см.ШРА2} = \sum_1^n Q_{см.зр} \quad (6)$$

$$Q_{см.ШРА2} = 6,2 + 11,6 + 2,29 + 9 + 4,1 + 14,8 + 4,2 + 1,8 + 3,4 + 3,4 + 2,5 + 3,75 = 67,1 \text{кВАр}$$

- модуль силовой сборки m [10]

$$m = \frac{P_{ном.наиб.ШРА2}}{P_{ном.ШРА2}} \quad (7)$$

$$m = \frac{50}{1,2} = 42 \geq 3$$

где $P_{ном.наиб.}$ - единичная номинальная мощность наибольшего по мощности электроприёмника, кВт;

$P_{ном}$ - единичная номинальная мощность наименьшего по мощности электроприёмника, кВт

- коэффициент использования $K_{и.ШРА2}$

$$K_{и.ШРА2} = \frac{P_{см.ШРА2}}{P_{ном.ШРА2}} \quad (8)$$

$$K_{и.ШРА2} = \frac{64,69}{188,5} = 0,34 \geq 0,2$$

- средневзвешенный тангенс потерь $tg\phi_{ШРА2}$

$$tg\phi_{ШРА2} = \frac{Q_{см.ШРА2}}{P_{см.ШРА2}} \quad (9)$$

$$tg\phi_{ШРА2} = \frac{67,1}{64,69} = 1,03 \rightarrow \cos\phi_{ШРА2} = 0,69$$

- эффективное число электроприёмников

$$n_3 = 8 \text{ т.к. } m > 3, K_{\text{н}} > 0,2, n > 5$$

$$n = \frac{2 \sum_1^n \cdot P_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ.наиб}}} \quad (10)$$

$$n = \frac{2 \cdot 188,5}{50} = 7,54 \approx 7$$

- коэффициент максимума $K_{\text{макс}}$

$$K_{\text{макс}} = 1,72$$

- максимальная активная мощность $P_{\text{макс.ШРА2}}$, кВт

$$P_{\text{макс.ШРА2}} = P_{\text{см.ШРА2}} \cdot K_{\text{макс}} \quad (11)$$

$$P_{\text{макс.ШРА2}} = 64,69 \cdot 1,72 = 111,2 \text{ кВт}$$

- максимальная реактивная мощность $Q_{\text{макс.ШРА2}}$, кВАр

$$Q_{\text{макс.ШРА2}} = Q_{\text{см.гр}}, \text{ если } n \geq 10$$

$$Q_{\text{макс.ШРА2}} = 67,1 \text{ кВАр}$$

- максимальная полная мощность $S_{\text{макс.ШРА2}}$, кВАр

$$S_{\text{макс.ШРА2}} = \sqrt{P_{\text{макс.ШРА2}}^2 + Q_{\text{макс.ШРА2}}^2} \quad (12)$$

$$S_{\text{макс.ШРА2}} = \sqrt{111,2^2 + 67,2^2} = 133,5 \text{ кВАр}$$

-максимальный ток $I_{\text{макс.ШРА2}}$, А

$$I_{\text{макс.ШРА2}} = \frac{S_{\text{макс.ШРА2}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (13)$$

$$I_{\text{макс.ШРА2}} = \frac{133,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 202,8 \text{ А}$$

2.2 Расчет силовой нагрузки магистрального шинпровода ШМА

- определяем номинальную мощность ЭП, получающих питание от ШМА:

$$P_{\text{ном.ШМА}} = \sum_1^n \cdot P_{\text{ном.зр}} \quad (14)$$

$$P_{\text{ном.ШРА2}} = 13,8 + 102,9 + 44 + 188,5 + 195 = 544,2 \text{ кВт}$$

- находим среднее за наиболее загруженную смену значение активной нагрузки:

$$P_{\text{см.ШМА}} = \sum_1^n \cdot P_{\text{см.зр}} \quad (15)$$

$$P_{\text{см.ШМА}} = 3,16 + 47,25 + 31,25 + 64,69 + 69 = 215,35$$

- находим среднее за наиболее загруженную смену значение реактивной нагрузки:

$$Q_{\text{см.ШМА}} = \sum_1^n \cdot Q_{\text{см.зр}} \quad (16)$$

$$Q_{см.ШМА} = 7 + 107 + 19,7 + 67,1 + 134,6 = 335,4 \text{кВар}$$

- определяем коэффициент m [11]

$$m = \frac{P_{ном.наиб.ШРА2}}{P_{ном.ШРА2}} \quad (17)$$

$$m = \frac{53}{1,2} = 44 \geq 3$$

- групповой коэффициент использования для ШМА:

$$K_{И.ШМА} = \frac{P_{см.ШМА}}{P_{ном.ШМА}} \quad (18)$$

$$K_{И.ШРА2} = \frac{215,35}{544,2} = 0,39 \geq 0,2$$

- находим средневзвешенное значение коэффициента мощности:

$$tg\phi_{ШМА} = \frac{Q_{см.ШМА}}{P_{см.ШМА}} \quad (19)$$

$$tg\phi_{ШМА} = \frac{335,4}{215,35} = 1,55 \rightarrow \cos\phi_{ШМА} = 0,54$$

- определяем эффективное число ЭП [7]:

$$n_э = 21, \text{ т.к. } m > 3, K_{И} > 0,2, n > 5$$

$$n = \frac{2 \sum_1^n \cdot P_{ном}}{P_{ном.наиб}} \quad (20)$$

$$n = \frac{2 \cdot 544,2}{53} = 20,5 \approx 21$$

- найдем значение коэффициента максимума по справочной таблице для магистральных шинопроводов:

$$K_{макс} = 1,24$$

- определяем максимальное значение расчетной нагрузки ШМА:

$$P_{макс.ШМА} = P_{см.ШМА} \cdot K_{макс} \quad (21)$$

$$P_{макс.ШМА} = 215,35 \cdot 1,24 = 267 \text{ кВт}$$

- определяем максимальное значение расчетной реактивной нагрузки ШМА:

$$Q_{макс.ШМА} = Q_{см.гр} , \text{ если } n \geq 10$$

$$Q_{макс.ШМА} = 335,4 \text{ кВАр}$$

- максимальная полная мощность $S_{макс.ШМА2}$, кВАр

$$S_{макс.ШМА} = \sqrt{P_{макс.ШМА}^2 + Q_{макс.ШМА}^2} \quad (22)$$

$$S_{макс.ШМА} = \sqrt{267^2 + 335,4^2} = 428,7 \text{ кВАр}$$

- максимальный ток $I_{\text{макс.ШМА}}$, А [4]

$$I_{\text{макс.ШМА}} = \frac{S_{\text{макс.ШМА}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (23)$$

$$I_{\text{макс.ШРА2}} = \frac{428,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 651,2 \text{ А}$$

Расчет по остальным распределительным устройствам выполнен аналогично, результаты расчета сведены в таблицу 3.

2.3 Расчет осветительной нагрузки

«Освещение имеет важное гигиеническое значение. Хорошее освещение создает благоприятные условия для жизни и деятельности человека. Важно не просто освещать помещение или отдельное рабочее место, а создавать освещение, которое соответствовало бы характеру выполняемой работы» [3].

Исходные данные:

- высота подвеса $h_c = 0,6$ м;
- размеры цеха $A \times B \times H = 48 \times 32 \times 6$ м.
- нормируемая освещенность $E_n = 300$ лк;
- коэффициент запаса $K_z = 1,5$;
- высота рабочей поверхности $h_p = 0,8$ м;
- высота подвеса светильников над рабочей поверхностью H_p , м

$$H_p = H - h_c - h_p \quad (24)$$

$$H_p = 6 - 0,6 - 0,8 = 4,4 \text{ м}$$

Таблица 3 - Расчет электрических нагрузок

№ п/п	Наименование потребителя	Количество, п	Установленная мощность		m	Ки	cosφ / tgφ	Средняя нагрузка		пэ	Км	Максимальная мощность			Максимальный ток I _{макс} А
			Одного ЭП, P _{ном.} , кВт	Общая, P _{ном. уст} кВт				P _{см} кВт	Q _{см} кВАр			P _{макс} кВт	Q _{макс} кВАР	S _{макс} кВА	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3	Стеллаж передвижной	1	3	3	-	0,3	0,4/ 2,29	0,9	2	-	-	-	-	-	-
9	Накопитель для стекла	9	1,2	10,8	-	0,2	0,4/ 2,29	2,16	5	-	-	-	-	-	-
	ПР №1	10>5	-	13,8	2,5<3	0,22> 0,2	0,4/ 2,29	3,16	7	10	1,84	5,8	7	9	13,7
1	Тележка рельсовая	1	5	5	-	0,2	0,4/ 2,29	1	2,29	-	-	-	-	-	-
2	Стол обработки	1	3	3	-	0,25	0,52/ 1,64	0,75	1,23	-	-	-	-	-	-
3	Стеллаж передвижной	4	3	12	-	0,3	0,4/ 2,29	3,6	8,2	-	-	-	-	-	-
10	Стеллаж двухсторонний	4	3	12	-	0,2	0,4/ 2,29	2,4	5,5	-	-	-	-	-	-
11	Стол раскроя	3	5,3	15,9	-	0,25	0,52/ 1,64	4	9,1	-	-	-	-	-	-
21	Печь индукционная	1	40	40	-	0,7	0,35/ 2,67	28	74,8	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 3

22	Роботизированная техника	3	5	15	-	0,5	0,8/ 0,75	7,5	5,7	-	-	-	-	-	-
	ШРА №1	17>5	-	102,9	13,4>3	0,46>0,2	0,41/ 2,26	47,25	107	5	1,57	74,2	107	138,7	210,7
20	Конвейер подвесной	1	37	37	-	0,75	0,85/ 0,61	27,75	17	-	-	-	-	-	-
22	Роботизированная техника	1	7	7	-	0,5	0,8/ 0,75	3,5	2,7	-	-	-	-	-	-
	ПР №2	2>5	-	44	5,2>3	0,71>0,2	0,84/ 0,63	31,25	19,7	2	1,29	40,3	21,67	44,8	68,2
3	Стеллаж передвижной	3	3	9	-	0,3	0,4/ 2,29	2,7	6,2	-	-	-	-	-	-
4	Установка вакуумная	1	50	50	-	0,2	0,65/ 1,16	10	11,6	-	-	-	-	-	-
6	Накопитель для стекла	2	2	4	-	0,25	0,4/ 2,29	1	2,29	-	-	-	-	-	-
8	Сушильная камера	1	47,2	47,2	-	0,6	0,95/ 0,32	28,32	9	-	-	-	-	-	-
12	Станок обработки торцевых сторон	2	5	10	-	0,25	0,52/ 1,64	2,5	4,1	-	-	-	-	-	-
13	Стеллаж для сушки	2	13	26	-	0,25	0,4/ 2,29	6,5	14,8	-	-	-	-	-	-
14	Линия обработки прямых кромок	1	10,3	10,3	-	0,25	0,52/ 1,64	2,57	4,2	-	-	-	-	-	-
15	Станок сверлильный	1	4	4	-	0,4	0,65/ 1,16	1,6	1,85	-	-	-	-	-	-
16	Стеллаж накопительный	5	1,2	6	-	0,25	0,4/ 2,29	1,5	3,4	-	-	-	-	-	-
17	Накопитель для обработки листового стекла	5	1,2	6	-	0,25	0,4/ 2,29	1,5	3,4	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 3

19	Стол склейки и упаковки	2	3	6	-	0,25	0,52/ 1,64	1,5	2,5	-	-	-	-	-	-
22	Роботизированная техника	2	5	10	-	0,5	0,8/ 0,75	5	3,75	-	-	-	-	-	-
	ШРА №2	27>5	-	118,5	42>3	0,34>0,2	0,69/ 1,03	64,69	67,1	8	1,72	111,2	67,1	133,5	202,8
3	Стеллаж передвижной	1	3	3	-	0,3	0,4/ 2,29	0,9	2,1	-	-	-	-	-	-
4	Установка вакуумная	1	50	50	-	0,25	0,65/ 1,16	12,5	14,5	-	-	-	-	-	-
5	Насос вакуумный	2	17	34	-	0,25	0,65/ 1,16	8,5	9,8	-	-	-	-	-	-
7	Машина лаколивная	1	3	3	-	0,25	0,4/ 2,29	0,75	1,7	-	-	-	-	-	-
17	Накопитель для обработки листового стекла	10	1,2	12	-	0,2	0,4/ 2,29	2,4	5,5	-	-	-	-	-	-
18	Пескоструйный аппарат	1	53	53	-	0,3	0,52/ 1,64	15,9	26	-	-	-	-	-	-
21	Печь индукционная	1	40	40	-	0,7	0,35/2,67	28	75	-	-	-	-	-	-
	ШРА №3	17>5	-	195	44>3	0,35>0,2	0,45/ 1,95	69	134,6	7	1,8	124,2	134	193,2	293,5
	ШМА	73>5	-	544,2	44>3	0,39>0,2	0,54/ 1,55	215,35	335,4	21	1,24	267	335,4	428,7	651,4
	Освещение	176	0,039	8	-	0,95	0,9/ 0,48	7,6	3,7	-	-	-	-	-	-
	Итого с освещением	73>5	-	552,2	44>3	0,4>0,2	0,55/ 1,5	227,35	342,7	7	1,24	282	342,7	443,7	674,2
	Компенсация	-	-	-	-	-	-	-	-200	-	-	-	-	-	-
	Итого с комп.	73>5	-	552,2	44>3	0,4>0,2	089/0,53	227,35	122,7	7	1,24	282	122,7	307,5	467,2

- расчетное значение расстояния между рядами светильников L , м [2]

$$L = \lambda \cdot H_p \quad (25)$$

$$L = 4,4 \cdot 0,7 = 3,08 \approx 3 \text{ м}$$

- расчетное значение расстояния до первого ряда светильников ℓ , м [4]

$$\ell = 0,5 \cdot L \quad (26)$$

$$\ell = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ м}$$

- количество светильников по ширине N_A , шт

$$N_A = \frac{A - 2\ell}{L} + 1 \quad (27)$$

$$N_A = \frac{48 - 2 \cdot 1,5}{3} + 1 = 16 \text{ шт}$$

- количество светильников по длине N_B , шт

$$N_B = \frac{B - 2 \cdot \ell}{L} + 1 \quad (28)$$

$$N_B = \frac{32 - 2 \cdot 1,5}{3} + 1 = 11 \text{ шт}$$

- общее число светильников $N_{об}$, шт

$$N_{об} = N_A \cdot N_B \quad (29)$$

$$N_{об} = 16 \cdot 11 = 176шт$$

Принять и установить расположение светильников вдоль архитектурных линий здания, с расстоянием между светильниками по длине 3 м, по ширине 3 м, расстояние от стены до линий светильников 1,5 м.

- расчетное значение светового потока Φ_p , лм [6]

$$\Phi_p = \frac{A \cdot B \cdot E \cdot K_3 \cdot Z}{N_{об} \cdot \eta} \quad (30)$$

где S – площадь помещения;

E_n – нормируемая освещенность $E_n = 300$ лк;

K_3 – коэффициент запаса $K_3 = 1,5$;

Z – коэффициент усредняющий среднюю минимальную освещенность $Z = 1,15$

η - КПД ламп светильника $\eta = 0,8$

$$\Phi_p = \frac{300 \cdot 48 \cdot 32 \cdot 1,5 \cdot 1,15}{2 \cdot (16 \cdot 11) \cdot 0,8} = 2822,5лм$$

- нормированная освещенность E_p , лк

$$E_p = \frac{\Phi_n \cdot E_n}{\Phi_p} \quad (31)$$

$$E_p = \frac{5200 \cdot 300}{2822,5} = 552лк$$

- коэффициент запаса K_3

$$K_3 = \frac{E_p}{E_n} \quad (32)$$

$$K_3 = \frac{552}{300} = 1,84$$

Выбраны светильники LED LL-DVO-041-M со светодиодными лампами, мощностью 39 Вт, со световым потоком 5200 лм.

2.4 Электрический расчет осветительной сети

Электрический расчет осветительной сети производится с целью выбора марки провода (кабеля), определения сечения питающих проводников, а также выбора типов защитных аппаратов.

- активная мощность осветительной нагрузки $P_{осв}$ кВт [8]

$$P_{осв} = N \cdot P_l \cdot K_{И} \cdot K_{пра} \quad (33)$$

где $K_{И} = 0,95$ коэффициент использования;

$K_{пра} = 1,12$ - коэффициент пуско-регулирующей аппаратуры;

$$P_{осв} = 16 \cdot 11 \cdot 0,039 \cdot 0,95 \cdot 1,12 = 8 \text{ кВт}$$

- реактивная мощность осветительной нагрузки $Q_{осв}$ кВАр

$$Q_{осв} = P_{осв} \cdot \text{tg} \phi \quad (34)$$

$$Q_{осв} = 8 \cdot 0,48 = 4 \text{ кВАр}$$

- полная мощность осветительной нагрузки $S_{осв}$ кВА

$$S_{осв} = \sqrt{P_{осв}^2 + Q_{осв}^2} \quad (35)$$

$$S_{осв} = \sqrt{8^2 + 4^2} = 10$$

- максимальный ток осветительной нагрузки $I_{осв}$, А

$$I_{осв} = \frac{S_{осв} \cdot K_{пуск}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \quad (36)$$

$$I_{осв} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 1,4}{\sqrt{3} \cdot 380} = 21,2 \text{ А}$$

- ток теплового расцепителя вводного автомата $I_{ТР}$ А [12]

$$I_{ТР} = 1,15 \cdot I_{осв} \quad (37)$$

$$I_{ТР} = 1,15 \cdot 21,2 = 25 \text{ А}$$

- номинальный ток отходящей линии $I_{л}$, А

$$I_{л} = I_{осв} / N_{A(B)} \quad (38)$$

$$I_{л} = 25 / 16 = 1,5$$

- ток теплового расцепителя автомата отходящей линии (на 2 ряда) $I_{ТР.л}$, А

$$I_{ТР.л} = 2 \cdot 1,15 \cdot I_{л} \quad (39)$$

$$I_{ТР.Л} = 2 \cdot 1,15 \cdot 2,1 = 4,8 А$$

К монтажу принято 8 линейных автоматических выключателей Schneider electric IC60N с $I_{НОМ}=6А$, $I_{ТР}=6А$, осветительная сеть выполнена осветительным шинопроводом «Басбар» E-line КАМ-0205-В-STD, с $I_{ДОП}=25 А > I_{ОСВ}=1,5 А$

К монтажу принят щиток освещения ОЩВ-9 УЛ4 на 9 отходящих линий с вводным автоматическим выключателем Schneider electric IC60N, $I_{НОМ}=50 А$, $I_{ТР}=50 А$, на восемь линейных автоматических выключателей Schneider electric IC60N с $I_{НОМ}=6 А$, $I_{ТР}=6 А$, подключение осветительного щитка к КТП выполнено кабелем ВВГ_{нг LS} 4x16, с $I_{ДОП}=60 А > I_{ОСВ}=21,2 А$

2.5 Компенсация реактивной мощности

«Компенсация реактивной мощности в настоящее время является немаловажным фактором, позволяющим решить вопрос энергосбережения практически на любом предприятии. По оценкам ведущих специалистов доля энергоресурсов, в частности электроэнергии, составляет порядка 30-40 % от стоимости продукции. Это достаточно веский аргумент, чтобы со всей серьезностью подойти к анализу энергопотребления и выработке методики компенсации реактивной мощности промышленного предприятия» [3].

- расчетное значения реактивной мощности установки Q_K , кВАр [14]

$$Q_K = a \cdot P_{см} \cdot (tg\phi - tg\phi_K) \quad (40)$$

где $a = 0,8$ – коэффициент, учитывающий изменение среднегодового потребления электрической энергии;

$tg\phi_1 = 1,5$ - значение тангенса угла сдвига фаз, соответствующее среднегодовому коэффициенту мощности $\cos\phi_1$ до компенсации;

$tg\phi_2 = 0,42$ - рекомендуемое значение $tg\phi$ энергосистемы (0,33-0,42)

$P_{cm} = 227,35$ - среднесменная активная мощность участка, кВт;

$$Q_K = 0,8 \cdot 227,35 \cdot (1,5 - 0,42) = 196,4 \text{ кВАр}$$

$$Q_{CTK} = 220 \text{ кВАр}$$

- фактическое значение тангенса потерь $\text{tg}\phi$ и коэффициент мощности $\cos\phi$ [11]

$$\text{tg}\phi = \text{tg}\varphi - \frac{Q_{CTK}}{P_{cm} \cdot a} \quad (41)$$

$$\text{tg}\phi = 1,5 - \frac{220}{227,35 \cdot 0,8} = 0,36 \rightarrow \cos\phi = 0,94$$

Окончательно к установке принимается два компенсатора УКМ (КРМ)- 0.4-110-10 с мощностью $Q_{ct} = 110$ кВАр на напряжение 0,4 кВ.

2.6 Выбор числа и мощности трансформаторов

«Выбор числа и мощности трансформаторов на подстанциях определяется величиной и характером электрических нагрузок (требуемой надежностью электроснабжения и характером потребления электроэнергии), территориальным размещением нагрузок, их перспективным изменением и при необходимости обосновывается технико-экономическими расчетами» [3].

Исходные данные:

- номинальное напряжение питающей сети - $U_H = 380/220$ В;
- коэффициент мощности после компенсации $\cos\phi = 0,89$
- среднесменная активная мощность $P_{cm} = 227,35$ кВт;
- среднесменная реактивная мощность $Q_{cm} = 122,7$ кВАр;

- максимальная полная мощность $S_{max} = 307,5$ кВАр

Мощность трансформатора должна соответствовать условию:

$$S_{TP} \geq S_{max.pac} \quad (42)$$

где S_{TP} – мощность трансформатора, кВА;

S_{max} – расчетное значение полной максимальной мощности после компенсации с учетом потерь трансформатора, кВА

- активные потери мощности трансформатора ΔP_{TP} , кВт [13]

$$\Delta P_{TP} = 0,02 \cdot S_{max} \quad (43)$$

$$\Delta P_{TP} = 0,02 \cdot 307,5 = 6,15 \text{ кВт}$$

- реактивные потери мощности трансформатора ΔQ_{TP} , кВАр

$$\Delta Q_{TP} = 0,1 \cdot S_{max} \quad (44)$$

$$\Delta Q_{TP} = 0,1 \cdot 307,5 = 3,1 \text{ кВАр}$$

- полные потери мощности трансформатора ΔS_{TP} , кВА

$$\Delta S_{TP} = \sqrt{\Delta P_{TP}^2 + \Delta Q_{TP}^2} \quad (45)$$

$$\Delta S_{TP} = \sqrt{6,15^2 + 3,1^2} = 6,9 \text{ кВА}$$

- расчетное значение полной максимальной мощности на высокой стороне $S_{TP.BH}$, кВА

$$S_{TP.BH} = S_{max} + \Delta S_{TP} \quad (46)$$

$$S_{TP.BH} = 307,5 + 6,9 = 314,4 \text{кВА}$$

2.6.1 Вариант А

К установке на КТП предварительно принято два трансформатора по 250 кВА

- коэффициент загрузки трансформатора K_3 [17]

$$K_3 = \frac{S_{max}}{S_T} \quad (47)$$

$$K_3 = \frac{314,4}{2 \cdot 250} = 0,64$$

- аварийный режим при отключении одного трансформатора

$$1,4 \cdot 250 = 350 \text{кВА} \geq 0,75 \cdot 314,4 = 235,8 \text{кВА}$$

Затраты на установку КТП с трансформаторами типа ТМГ – 400/10/0,4

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000}\right)^2 \cdot T_p \quad (48)$$

где τ – время максимальных потерь;

T_M – время использования максимальной нагрузки предприятия за год;

T_p – время работы трансформатора за год.

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4000}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 2450$$

$$C_0 = \left(\frac{a}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2}\right) \cdot T_p \quad (49)$$

где C_0 – удельная стоимость потерь холостого хода;

β – дополнительная плата за 1 кВт час потребляемой электроэнергии (0,9 руб/кВт·час);

$$C_0 = \left(\frac{105}{4000} + 0,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 8760 = 422,6 \text{ руб} / \text{кВт год}$$

$$C = \left(\frac{a}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau \quad (50)$$

$$C = \left(\frac{105}{4000} + 0,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 2405 = 116 \text{ руб} / \text{кВт год}$$

$$C \cdot \Delta P = C_0 \cdot P_{xx} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{кз} \quad (51)$$

$$C \cdot \Delta P = 422,6 \cdot 0,74 + 116 \cdot 0,64 \cdot 3,7 = 587,4$$

Стоимость трансформатора ТМГ-250 по данным 2019 года составляет 240000 руб.

$$E = 0,223$$

$$C_{ТЗ} = 210000 \text{ рублей}$$

$$Z_T = E \cdot C_{ТЗ} + C \cdot \Delta P_T \quad (52)$$

$$Z_T = 0,223 \cdot (210000 \cdot 2) + 587,4 \cdot 2 = 94834,8 \text{ рублей.}$$

2.6.2 Вариант Б

К установке на КТП предварительно принят трансформатор ТМГ 400 кВА

- коэффициент загрузки трансформатора K_3 [17]

$$K_3 = \frac{S_{max}}{S_T} \quad (53)$$

$$K_3 = \frac{314,4}{400} = 0,79$$

Затраты на установку КТП с трансформаторами типа ТМГ – 400/10/0,4

$$\tau = (0,124 + \frac{T_M}{10000})^2 \cdot T_p \quad (54)$$

где τ – время максимальных потерь;

T_M – время использования максимальной нагрузки предприятия за год;

T_p – время работы трансформатора за год.

$$\tau = (0,124 + \frac{4000}{10000})^2 \cdot 8760 = 2450$$

$$C_0 = (\frac{a}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2}) \cdot T_p \quad (55)$$

где C_0 – удельная стоимость потерь холостого хода;

β – дополнительная плата за 1 кВт час потребляемой электроэнергии (0,9 руб/кВт·час);

$$C_0 = (\frac{105}{4000} + 0,9 \cdot 10^{-2}) \cdot 8760 = 422,6 \text{ руб} / \text{кВт год}$$

$$C = (\frac{a}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2}) \cdot \tau \quad (56)$$

$$C = \left(\frac{105}{4000} + 0,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 2405 = 116 \text{ руб} / \text{кВт год}$$

$$C \cdot \Delta P = C_0 \cdot P_{xx} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{кз} \quad (57)$$

$$C \cdot \Delta P = 422,6 \cdot 0,74 + 116 \cdot 0,64 \cdot 3,7 = 587,4$$

Стоимость трансформатора ТМГ-400 по данным 2019 года составляет 430000 руб.

$$E = 0,223$$

$$C_{ТЗ} = 430000 \text{ рублей}$$

$$Z_T = E \cdot C_{ТЗ} + C \cdot \Delta P_T \quad (58)$$

$$Z_T = 0,223 \cdot 430000 + 587,4 \cdot 2 = 97064 \text{ рублей.}$$

Окончательно к установке выбрана двухтрансформаторная цеховая подстанция КТП с двумя трансформаторами ТМГ-250 10/0,4 (рисунок 2).

Технические характеристики трансформатора:

- номинальная мощность $S_{тр} = 250$ кВА;
- номинальное напряжение обмоток высшего напряжения $U_{1н} = 10$ кВ;
- номинальное напряжение обмоток низшего напряжения $U_{2н} = 0,4$ кВ;
- напряжение короткого замыкания $U_{кз} = 4,5$ %;
- потери мощности короткого замыкания $P_{кз} = 3,7$ кВт;
- потери холостого хода $P_{xx} = 740$ кВт



Рисунок 2 - Трансформатор ТМГ-250 10/0,4

2.7 Расчет и выбор аппаратов защиты

«Вопрос выбора защитного устройства является актуальным. Защищаемое оборудование становится все дороже и поэтому любая авария в электроустановке вызывает трудности в устранении поломки, связанные с поиском комплектующих, времени устранения поломки и стоимостью. Поэтому необходимо на стадии проектирования выбрать правильное защитное устройство исходя из многих критериев:

- доступность;
- надежность;
- экономичность изделия;
- комплексная экономичность» [3].

Защита на предохранителях работает лучше, но их не так удобно применять как автоматические выключатели. Оба варианта имеют место быть,

все зависит от применения. На вводах обычно используют предохранители, непосредственное перед нагрузкой автоматические выключатели.

Расчет и выбор автоматического выключателя показан на примере защиты станка обработки торцевых сторон изделий

- номинальный ток $I_{ном012}$, А [15]

$$I_{ном012} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \phi \cdot \eta} \quad (59)$$

$$I_{ном012} = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,52 \cdot 0,75} = 19,5$$

- ток теплового расцепителя $I_{тр.012}$, А

$$I_{тр012} = 1,15 \cdot I_{ном012} \quad (60)$$

$$I_{тр012} = 1,15 \cdot 19,5 = 22,4 \text{ А}$$

- пусковой ток $I_{пуск012}$, А [16]

$$I_{пуск012} = I_n \cdot K \quad (61)$$

$$I_{пуск012} = 19,5 \cdot 5 = 97,5 \text{ А}$$

- ток электромагнитного расцепителя $I_{эм.р.012}$, А

$$I_{эм.р.012} = I_{пуск012} \cdot 1,25 \quad (62)$$

$$I_{эм.р.012} = 97,5 \cdot 1,25 = 121,9 \text{ А}$$

Выбран автоматический выключатель Schneider electric IC60N с номинальным током $I_{ном} = 25А$ током теплового расцепителя $I_{т.р.} = 25А$, током электромагнитного расцепителя. $I_{эм.р.} = 250А$ Подключение электроприёмника выполнено кабелем ВВГнг LS 4x2,5 , с $I_{доп} = 25А$.

Аналогично произведен расчет и выбор автоматических выключателей и марки кабеля, сечение жилы и длительно допустимый тока для остальных электроприемников, результаты расчета сведены в таблицу 4.

2.8 Расчет токов короткого замыкания

«Для выбора типов и параметров срабатывания устройств защиты трансформаторов необходимо определить максимальное и минимальное значение токов при КЗ на выводах НН понижающего трансформатора, или, как чаще говорят, при КЗ за трансформатором. Максимальное значение тока соответствует трехфазному металлическому КЗ за трансформатором» [3].

Исходные данные для расчета токов короткого замыкания:

- базисная мощность системы неограниченной мощности $S_6 = 100$ МВА;
- базисное напряжение $U_6 = 115$ кВ;
- относительное базисное сопротивление системы неограниченной мощности принято $x_c = 0,4$;
- длина воздушной линии (ЛЭП) $L_1 = 80$ км;
- длина кабельной линии $L_2 = 1,5$ км;
- мощность головного трансформатора $S_{н.т} = 40$ МВА;
- напряжение короткого замыкания $u_{к.31} = 10,5\%$;
- мощность трансформатора цеховой КТП $S_{тр2} = 2 \cdot 250$ кВА;
- напряжение короткого замыкания $u_{к.32} = 4,5\%$;

На рисунке 3 приведены схемы для расчета токов КЗ.

Таблица 4 - Расчётно-монтажная

№ п/п	Наименование потребителя	Количество, п	Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	Номинальный ток $I_{ном}$, А	Пусковой ток $I_{пуск}$, А	Номинальный ток теплового расцепителя $I_{тр}$, А		Номинальный ток электромагнитного расцепителя $I_{эмр}$, А		Номинальный ток аппарата $I_{ном}$, А	Тип выбранного аппарата	Номинальный допустимый ток $I_{доп}$, А	Сечение провода S мм ²
						Расчётное значение	Стандартное значение	Расчётное значение	Стандартное значение				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	Стеллаж передвижной	1	3	15,1	75,8	17,4	20	94,8	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
9	Накопитель для стекла	9	1,2	6	23,5	7	10	35	100	10	Schneider electric IC60N 3П 10А	19	ВВГнг LS 4x1,5
ПР №1 типа ПР11-1045-21УЗс номинальным током $I_{ном} = 100$ А, Schneider electric IC60N 3П 25А, $I_{ном} = 25$ А													
1	Тележка рельсовая	1	5	25,3	126	29,1	40	158	400	40	Schneider electric IC60N	35	ВВГнг LS 4x4

Продолжение таблицы 4

2	Стол обработки	1	3	11,5	58,4	13,4	20	73,1	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	19	ВВГнг LS 4x1,5
3	Стеллаж передвижной	4	3	15,1	75,8	17,4	20	94,8	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
10	Стеллаж двухсторонний	4	3	15,1	75,8	17,4	20	94,8	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
11	Стол раскроя	3	5,3	20,6	103	23,7	32	128,75	320	32	Schneider electric IC60N 3П 32А	35	ВВГнг LS 4x4
21	Печь индукционная	1	40	180,2	540,6	207,23	250	675,7	2500	250	Schneider Electric EasyPact на ток 250А	305	ВВГнг LS 4x150
22	Роботизированная техника	3	5	11,8	59,3	13,6	20	74,1	200	20	Schneider electric IC60N	25	ВВГнг LS 4x2,5

Продолжение таблицы 4

ШРА №1 Шинопроводная система распределения энергии «Басбар» E-Line КО, 4-проводниковая: L1, L2, L3, N, PE (корпус), IP55, I _{НОМ} = 400А, Schneider Electric EasyPact на ток 400А , I _{НОМ} = 400А													
20	Конвейер подвесной	1	37	88,2	401,2	89,8	100	507,5	1000	100	Schneider electric C120N 3П 100А	95	ВВГнг LS 4x25
22	Роботизированная техника	3	5	11,8	59,3	13,6	20	74,1	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
ПР №2 типа ПР11-1045-21УЗс номинальным током I _{НОМ} = 100А, Schneider electric C120N 3П 100А, I _{НОМ} = 100А													
3	Стеллаж передвижной	3	3	15,1	75,8	17,4	20	94,8	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
4	Установка вакуумная	1	50	155,8	780,2	179,2	200	970,3	2000	200	Schneider Electric EasyPact на ток 200А	180	ВВГнг LS 4x70
6	Накопитель для стекла	2	2	10,1	50,5	11,6	20	63,3	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5

Продолжение таблицы 4

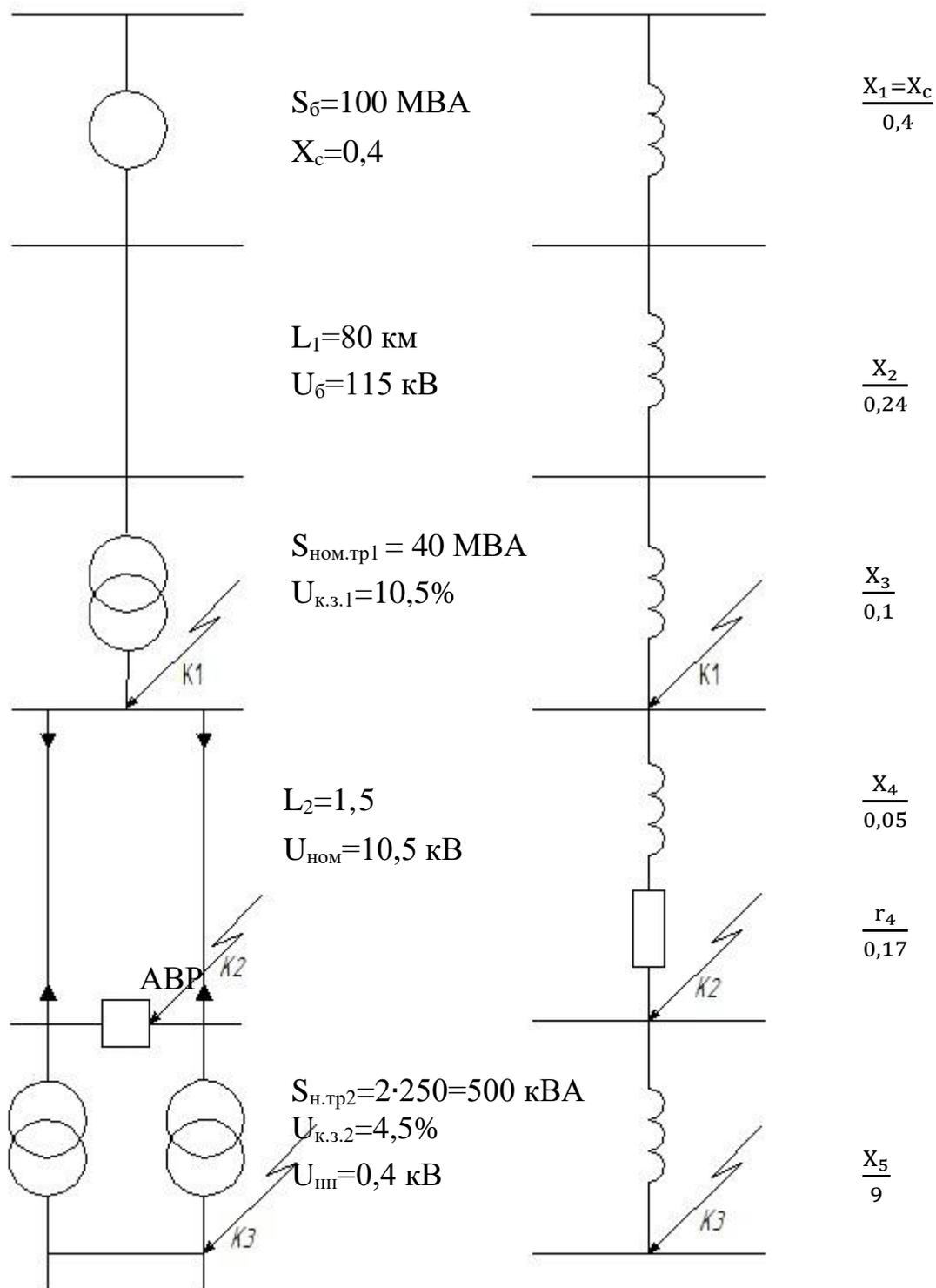
8	Сушильная камера	1	47,2	80	397	91,3	100	495,5	1000	100	Schneider electric C120N 3П 100А	95	ВВГнг LS 4x25
12	Станок обработки торцевых сторон изделий	2	5	19,4	97,3	22,4	25	121,7	250	25	Schneider electric IC60N 3П 25А	35	ВВГнг LS 4x4
13	Стеллаж для сушки	2	13	65,8	329,1	75,7	80	411,4	1000	80	Schneider electric C120N 3П 80А	75	ВВГнг LS 4x16
14	Линия обработки прямых кромок	1	10,3	40,1	200,7	46,1	63	250,7	630	63	Schneider electric IC60N 3П 63А	55	ВВГнг LS 4x10
15	Станок сверлильный	1	4	12,4	62,5	14,4	20	78,2	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x25
16	Станок накопительный	5	1,2	6	30,4	6,8	20	38,1	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5

Продолжение таблицы 4

17	Накопитель для обработки листового стекла	5	1,2	6	30,4	6,8	20	38,1	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
19	Стол склейки и упаковки	2	3	11,7	58,5	13,5	20	73,2	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
22	Роботизированная техника	3	5	11,8	59,3	13,6	20	74,1	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
ШРА №2 Шинопроводная система распределения энергии «Басбар» E-Line КО, 4-проводниковая: L1, L2, L3, N, PE (корпус), IP55, I _{НОМ} = 400А, Schneider Electric EasyPact на ток 400А, I _{НОМ} = 400А													
3	Стеллаж передвижной	3	3	15,1	75,8	17,4	20	94,8	200	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
4	Установка вакуумная	1	50	155,8	780,2	179,2	200	970,3	2000	200	Schneider Electric EasyPact на ток 200А	180	ВВГнг LS 4x70

Продолжение таблицы 4

5	Насос вакуумный	2	17	52,8	265,1	60,9	80	331,2	1000	100	Schneider electric C120N 3П 100А	75	ВВГнг LS 4x16
7	Машина лаколивная	1	3	15,1	75,8	17,4	20	94,8	200	20	Schneider electric IC60N	25	ВВГнг LS 4x2,5
17	Накопитель для обработки листового стекла	10	1,2	6	30,4	6,8	20	38,1	25	20	Schneider electric IC60N 3П 20А	25	ВВГнг LS 4x2,5
18	Пескоструйный аппарат	1	53	206	619,4	236,9	250	774,2	2500	250	Schneider Electric EasyPact на ток 250А	260	ВВГнг LS 4x120
21	Печь индукционная	1	40	180,2	540,6	207,23	250	675,7	2500	250	Schneider Electric EasyPact на ток 250А	305	ВВГнг LS 4x150
ШРА №3 Шинопроводная система распределения энергии «Басбар» E-Line КО, 4-проводниковая: L1, L2, L3, N, PE (корпус), IP55, I _{НОМ} = 400А, Schneider Electric EasyPact на ток 400А, I _{НОМ} = 400А													
ШМА Шинопроводная система распределения энергии «Басбар» E-Line КО, 4-проводниковая: L1, L2, L3, N, PE (корпус), IP55, I _{НОМ} = 1000А Schneider Electric EasyPact на ток 1000А, I _{НОМ} = 1000А													



а) схема расчетная

б) схема замещения

Рисунок 3 - Схемы к расчету токов короткого замыкания

- сопротивление системы x_1

$$x_1 = x_c = 0,4$$

- индуктивная сопротивление высоковольтной ЛЭП x_2 [18]

$$x_2 = \frac{x_0 \cdot L_1 \cdot S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} \quad (63)$$

где L_1 – длина воздушной линии, км;

$S_{\bar{6}}$ – базисная мощность, МВА;

$U_{\bar{6}}$ – базисное напряжение, кВ;

$x_0 = 0,4$ Ом/км – сопротивление воздушной линии

$$x_2 = \frac{0,4 \cdot 80 \cdot 100}{115^2} = 0,24$$

- сопротивление головного трансформатора, x_3

$$x_3 = \frac{U_{к.з.} \cdot S_{\bar{6}}}{100 \cdot S_{ном.тр}} \quad (64)$$

$$x_3 = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 100} = 0,1$$

- индуктивное сопротивление кабельной линии, x_4 [20]

$$x_4 = \frac{x_0 \cdot L_2 \cdot S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} \quad (65)$$

где $x_0 = 0,08$ Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля

$$x_4 = \frac{0,08 \cdot 1,5 \cdot 100}{2 \cdot 10,5^2} = 0,05$$

- активное сопротивление кабельной линии, r_4

$$r_4 = \frac{r_0 \cdot L_2 \cdot S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2} \quad (66)$$

где - $r_0 = 0,25$ Ом/км – активное сопротивление кабеля

$$r_4 = \frac{0,25 \cdot 1,5 \cdot 100}{(2 \cdot 10,5)^2} = 0,17$$

- сопротивление трансформатора, x_5

$$x_5 = \frac{U_{к.з.} \cdot S_{\bar{o}}}{100 \cdot S_{ном.тр2}} \quad (67)$$

$$x_5 = \frac{4,5 \cdot 100}{100 \cdot 2 \cdot 0,25} = 9$$

Расчет токов короткого замыкания в точке K_1

- суммарное сопротивление $X_{\Sigma_{к1}}$ [19]

$$X_{\Sigma_{к1}} = x_1 + x_2 + x_3 \quad (68)$$

$$X_{\Sigma_{к1}} = 0,4 + 0,24 + 0,1 = 0,74$$

- базисный ток $I_{б1}$, А

$$I_{\sigma 1} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}} \quad (69)$$

$$I_{\sigma 1} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}$$

- ток короткого замыкания $I_{\text{кз1}}$ кА [21]

$$I_{\text{кз1}} = \frac{I_{\sigma}}{X_{\Sigma \text{к1}}} \quad (70)$$

$$I_{\text{кз1}} = \frac{0,5}{0,74} = 0,67 \text{ кА}$$

- ударный ток короткого замыкания i_{y1} , кА

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{\text{кз}} \quad (71)$$

где $k_y = 1,8$ – ударный коэффициент для сетей высокого напряжения

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 0,67 = 1,7 \text{ кА}$$

Расчет токов короткого замыкания в точке K_2

- суммарное сопротивление $X_{\Sigma \text{к1}}$

$$X_{\Sigma \text{к2}} = X_{\Sigma \text{к1}} + x_4 \quad (72)$$

$$X_{\Sigma \text{к2}} = 0,74 + 0,05 = 0,79$$

- полное сопротивление $Z_{\text{к2}}$

$$z_{\kappa 2} = \sqrt{r_4^2 + X_{\Sigma \kappa 2}^2} \quad (73)$$

$$z_{\kappa 2} = \sqrt{0,17^2 + 0,79^2} = 0,83$$

Активное сопротивление кабеля учитывается, если оно больше 1/3 суммарного индуктивного сопротивления до расчетной точки короткого замыкания.

$$r_4 \leq \frac{1}{3} \cdot X_{\Sigma \kappa 2} \quad (74)$$

$$0,17 \leq \frac{1}{3} \cdot 0,79 = 0,27$$

- базисный ток $I_{\delta 2}$, А

$$I_{\delta 2} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} \quad (75)$$

$$I_{\delta 2} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}$$

- ток короткого замыкания $I_{\kappa 32}$ кА

$$I_{\kappa 32} = \frac{I_{\delta}}{X_{\Sigma \kappa 2}} \quad (76)$$

$$I_{\kappa 32} = \frac{5,5}{0,79} = 6,8 \text{ кА}$$

- ударный ток короткого замыкания i_{y2} , кА

$$i_{y2} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{кз} \quad (77)$$

где $K_y = 1,2$ – ударный коэффициент

$$i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 1,2 \cdot 0,68 = 11,5 \text{ кА}$$

- мощность короткого замыкания $S_{кз2}$, МВА [19]

$$S_{кз2} = \frac{S_{\sigma}}{x_{\Sigma \kappa 2}} \quad (78)$$

$$S_{кз2} = \frac{100}{0,79} = 125,5$$

Расчет токов короткого замыкания в точке K_3

- суммарное сопротивление $X_{\Sigma \kappa 3}$

$$X_{\Sigma \kappa 3} = X_{\Sigma \kappa 2} + x_5 \quad (79)$$

$$X_{\Sigma \kappa 2} = 0,79 + 9 = 9,79$$

- базисный ток $I_{\sigma 3}$, А

$$I_{\sigma 3} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{нн}} \quad (80)$$

где $U_{нн} = 0,4$ кВ – номинальное напряжение на низкой стороне трансформатора цеховой КТП

$$I_{\sigma 2} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 144,33 \text{ кА}$$

- ток короткого замыкания $I_{\text{кз3}}$ кА

$$I_{\text{кз3}} = \frac{I_{\sigma}}{X_{\Sigma \text{кз}}} \quad (81)$$

$$I_{\text{кз2}} = \frac{144,33}{9,79} = 14,7 \text{ кА}$$

- ударный ток короткого замыкания i_{y3} , кА

$$i_{y3} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{\text{кз}} \quad (82)$$

$$i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 1,2 \cdot 14,7 = 25 \text{ кА}$$

- мощность короткого замыкания $S_{\text{кз3}}$, МВА

$$S_{\text{кз3}} = \frac{S_{\sigma}}{x_{\Sigma \text{кз}}} \quad (83)$$

$$S_{\text{кз2}} = \frac{100}{9,79} = 10,2 \text{ МВА}$$

2.9 Выбор высоковольтного кабеля

«Для передачи электроэнергии большой мощности и на напряжении свыше 6 кВ служат высоковольтные (силовые) кабели. Такие кабели содержат в своей конструкции элементы, обеспечивающие надежность, долговечность

использования. Кроме того, высоковольтные кабели обладают хорошими механическими и диэлектрическими свойствами. Толщина изоляции в таких кабелях составляет 4-6 мм, может быть бумажно-масляной, но чаще всего из сшитого полиэтилена» [3]. По сравнению с обычными силовыми кабелями высоковольтные с изоляцией из сшитого полиэтилена обладают термической устойчивостью при коротком замыкании. Обладают меньшим весом, а также меньшим диаметром и радиусом изгиба. «Токопроводящая жила может быть алюминиевой или медной. Также высоковольтные кабели обладают низкой горючестью с отсутствием галогенов. Допустимая температура окружающей среды при эксплуатации высоковольтных кабелей колеблется от -50 градусов до +60 градусов, при коротком замыкании – до +250 градусов. Срок службы современных высоковольтных кабелей составляет минимум 30 лет» [3].

- номинальный ток трансформатора $I_{н.тр}$, А

$$I_{н.тр} = \frac{S_{н.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \quad (84)$$

где $S_{н.тр}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ

$$I_{н.тр} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 13,7 \text{ А}$$

- предварительное сечение кабеля S , мм²

$$S_{\vartheta} = \frac{I_{ном}}{\gamma_{\vartheta}} \quad (85)$$

где $\gamma_{\vartheta} = 1,9$ - экономическая плотность тока для алюминиевого кабеля

$$S_3 = \frac{13,7}{1,9} = 7,2 \text{ мм}^2$$

Предварительно выбран кабель с алюминиевой жилой стандартного сечения $S_{ст} = 16 \text{ мм}^2$

- проверка сечения на термическую устойчивость $S_{мин}$, мм^2

$$S_{мин} = \frac{I_{к.з.к.2} \cdot \sqrt{t_{пр}}}{c} \quad (86)$$

где $c = 85$ – для кабеля с алюминиевой жилой [21]

$$S_{мин} = \frac{6,8 \cdot \sqrt{0,4}}{85} = 50,6 \text{ мм}^2$$

Окончательно к монтажу принят алюминиевый высоковольтный кабель марки А-CREOLON 3x70 RM/10 6/10 кВ с длительно допустимым током $I_d = 190 \text{ А}$

2.10 Выбор высоковольтных выключателей, разъединителей, трансформаторов тока

«Все виды аппаратов должны выбираться в соответствии с вычисленными максимальными расчетными величинами (тока, напряжения, мощностью отключения) для нормального режима короткого замыкания.

Разъединитель – это контактный коммутационный аппарат, предназначенный для отключения и включения электрической цепи без тока или с незначительным током, и который для обеспечения безопасности имеет между контактами в отключённом положении изоляционный промежуток» [3].

Трансформатор тока – предназначен для уменьшения первичного тока до значений, наиболее удобных для измерительных приборов и реле, а также для отделения цепей измерения и защиты от первичных цепей высокого напряжения.

«Для их выбора сравнивают указанные расчетные величины с допустимыми значениями для высоковольтного оборудования.

Составляют таблицу сравнения указанных расчетных и допустимых величин. При этом, для обеспечения надежной безаварийной работы расчетные величины должны быть меньше допустимых значений.

Разъединители – аппараты, не предназначенные для отключения токов короткого замыкания, поэтому на отключающую способность их не проверяют» [3].

Результаты выбора сводим в таблицу 5.

2.11 Расчет заземления трансформаторной подстанции

«Произведём расчёт заземления для цеха, для того чтобы определить сопротивление сооружаемого контура заземления при эксплуатации, его размеры и форму. Как известно, контур заземления состоит из вертикальных заземлителей, горизонтальных заземлителей и заземляющего проводника. Вертикальные заземлители вбиваются в почву на определенную глубину. Горизонтальные заземлители соединяют между собой вертикальные заземлители. Заземляющий проводник соединяет контур заземления непосредственно с электрощитом» [3]. Вид грунта чернозём $\rho_{гр} = \rho_3 = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Заземлители укладывают в ряд или по контуру на такую глубину, при которой от верхнего края заземлителя до края земли остается 0,5-0,8 м. Расстояние между вертикальными заземлителями не менее 2,5-3м

Сопротивление заземляющего устройства не должно превышать 4 Ом.

Таблица 5- Высоковольтное оборудование

Выключатель вакуумный ВБПЭ-10-20/630 УЗ		Разъединитель РВ-10/400 УХЛ2		Трансформатор тока ТОЛ 10	
Расчетное	Паспортные	Расчетные	Паспортные	Расчетные	Паспортные
$U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$	$U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$	$U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$	$U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$	$U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$	$U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$
$I_H = 34,65 \text{ А}$	$I_H = 630 \text{ А}$	$I_H = 34,65 \text{ А}$	$I_H = 630 \text{ А}$	$I_H = 34,65 \text{ А}$	$I_H = 75 \text{ А}$
$i_y = 11,5 \text{ кА}$	$I_{откл\ с\ л} = 52 \text{ кА}$	$i_y = 11,5 \text{ кА}$	$I_{откл\ с\ л} = 52 \text{ кА}$	-	-
$I_{к.3.2} = 6,8 \text{ кА}$	$I_{откл} = 20 \text{ кА}$	-	-	-	-
$I_{к.3.2}^2 \cdot t_{пр} =$ $6,8^2 \cdot 0,4 = 18,5$	$I_5^2 \cdot t_5 = 20^2 \cdot 5$ $= 2000 \text{ кА} \cdot \text{с}$	$I_{к.3.2}^2 \cdot t_{пр} =$ $= 6,8^2 \cdot 0,4 =$ $= 18,5$	$I_{10}^2 \cdot t_{10} =$ $= 10^2 \cdot 10 =$ $= 1000 \text{ кА} \cdot \text{с}$	$K_d = \frac{i_y}{\sqrt{2}} \cdot I_H$ $= \frac{11,52}{\sqrt{2}} \cdot 0,075$ $= 108,61$	$K_d = 250$
$S_k = 123,46 \text{ МВА}$	$S_{откл} = 350 \text{ МВА}$	-	-	$K_T = I_{к.3.1} \cdot \frac{\sqrt{t_{пр}}}{I_H}$ $= 6,8 \cdot \frac{\sqrt{0,4}}{0,075}$ $= 57,34$	$K_T = 90$

- допустимое сопротивление заземляющего устройства, с учетом удельного сопротивления грунта

$$R_{з.ст} = \frac{P_{зп}}{l_{ст}} \cdot 0,9 \quad (87)$$

где $p_{гр}$ - удельное сопротивление грунта,

$l_{ст}$ - длина вертикального заземляющего стержня

$$R_{з.ст} = \frac{50}{2,5} \cdot 0,9 = 18 \text{ Ом}$$

- количество вертикальных заземлителей

$$n_в = \frac{R_{з.ст}}{n_г \cdot R_г} \quad (88)$$

где $n_в$ - коэффициент использования заземлителей, расположенных по контуру

$$n_в = \frac{18}{0,7 \cdot 4} = 6,5$$

- длина горизонтального заземлителя $l_г$, м

$$l_г = a \cdot n_в \quad (89)$$

где a - расстояние между вертикальными заземлителями

$$l_г = 2,5 \cdot 6,5 = 17,5 \text{ м}$$

- сопротивление растекания горизонтального заземлителя $R_г$, Ом

$$R_2 = 2,1 \cdot \frac{P}{l_2} \quad (90)$$

где P – периметр цеха.

Если длина горизонтального контура заземлителя меньше периметра цеха, то длина контура берется равной периметру цеха плюс 12-18 м

$$R_2 = 2,1 \cdot \frac{160}{175} = 1,92$$

- сопротивление растекания тока R_r , Ом

$$R_2 = \frac{R_{3.cm} \cdot R_2}{h_n \cdot R_{3.cm} + h_m \cdot R_2 \cdot n_6} \quad (91)$$

где h_m – коэффициент экранирования, $h_m = 1$

$$R_2 = \frac{18 \cdot 1,92}{0,36 \cdot 18 + 1 \cdot 1,92 \cdot 6,5} = 1,8$$

Заземление 1,92 Ом удовлетворяет требованию (в установках до 1000В, сопротивление не должно превышать 4 Ом)

В разделе произведен расчет ожидаемых электрических нагрузок по производству с учетом мощности системы электрического освещения и реактивной мощности компенсирующих устройств. Выбраны в результате технико-экономического сравнения двух вариантов трансформаторы на КТП. Произведен расчет токов короткого замыкания, выбраны и проверены аппараты защиты.

Заключение

Выпускная квалификационная работа на тему: «Электроснабжение предприятия по рециклингу стекольной продукции» выполнена с учётом всех технологических особенностей производства.

Для обеспечения надежности электроснабжения выбрана смешанная схема устройства сетей. Выполнен расчёт силовых нагрузок методом коэффициента максимума, с учётом режима работы оборудования. В схеме питания участка, применяется шинопровод типа ШМА, кабели ВВГ различных сечений с медной жилой.

На основании расчётов выбрана двухтрансформаторная подстанция КТП, с силовыми трансформаторами ТМГ-250/10/0,4, трансформаторы подключены параллельно. Для обеспечения компенсации реактивной мощности и увеличения $\cos \varphi$, установлены два компенсатора централизованного исполнения в РУ трансформаторной подстанции, тип установки УKM (KPM)-0.4-110-10, УХЛ4 с мощностью 110 кВА каждый.

Произведён расчёт рабочего освещения, в результате к установке приняты светильники LED LL-DVO-041-M со светодиодными лампами, мощностью 39 Вт. В результате сеть обеспечивает нормируемую освещённость 300 лк в основных производственных помещениях.

Произведен расчет токов короткого замыкания, выбраны и проверены аппараты защиты и кабели.

Произведен выбор и проверка высоковольтного питающего КТП кабеля и аппаратов, установленных в ячейке ГПП.

Предусмотрен контур заземления для обеспечения защиты персонала от поражения электрическим током.

Список используемых источников

1. Вахнина В. В., Черненко А. Н. Проектирование систем электроснабжения. /Электронное учебно- методическое пособие. М. : Тольятти, 2016.
2. Внутрицеховое электроснабжение [Электронный ресурс] : – Режим доступа: https://studopedia.ru/4_114193_vnutritsehovoe-elektrosnabzhenie.html - Заглавие с экрана (дата обращения 08.05.2021).
3. Карманова Т.Е. Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения: Учебное пособие/Учреждение образования «Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова», 2015.
4. Киреева Э. А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий. М. : КноРус, 2016. 368 с.
5. Конюхова Е. А. Электроснабжение объектов: Учебное пособие. М. : Academia, 2013. 320 с.
6. Кудрин Б. И. Электроснабжение: Учебник. М. : Academia, 2015. – 352 с. 52
7. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7 нормы [Текст]. – Введ. 2003 – 01 – 01. – М. : ЗАО «Энергосервис», 1998. – 980 с.
8. РФ. Росстандарт. ГОСТ Р 50786-2012. Станки металлообрабатывающие малогабаритные. Требования безопасности : Введ. 2013-03-02. М., Стандартинформ, 2013.
9. Сибикин Ю. Д. Техническое обслуживание, ремонт электрооборудования и сетей промышленных предприятий: учебное пособие. М. : 2014. 414 с.
10. Сибкин Ю. Д., Сибикин М. Ю., Яшков В. А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: Учебное пособие. М. : Форум : Инфра-М, 2015. 368 с.

11. Сивков А. А., Сайгаш А. С., Герасимов Д. Ю. Основы электроснабжения: Учебное пособие. М. : Юрайт, 2016. 174 с.
12. Суворин А. В. Электрические схемы электроустановок. Составление и монтаж: Практическое пособие. М. : Феникс, 2015. 544 с.
13. Хорольский В. Я., Таранов М. А. Надежность электроснабжения: Учебное пособие. М. : ДРОФА, 2013. 128 с.
14. Шеховцов В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования. М.: ФОРУМ : ИНФРА – М, 2014. 214 с.
15. Щербаков Е. Ф., Александров Д. С. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: Учебное пособие. М. : Форму ; ИнфраМ, 2014. 596 с.
16. Энергосбережение в системах промышленного электроснабжения – Теплоэнергетик. М. : Интехэнерго-Издат, 2014. 304 с.
17. Bob Everett, Stephen Peake, Janet Ramage, Energy Systems and Sustainability: Power for a Sustainable Future/OUP Oxford; 2 edition, 2013. – 672 pages.
18. Fernando Pacheco-Torgal Claes Granqvist Bjorn Jelle, Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting 1st Edition/ Woodhead Publishing, 2017. – 632 pages
19. Godfrey Boyle, Renewable Energy: Power for a Sustainable Future/ OUP Oxford; 3 edition, 13 Sept. 2012. - 584 pages.
20. Khan S., Khan S., Ahmed G. Industrial power systems. Boca Raton: CRC Press, 2016.
21. Method for determining quality indicators of electrical power, authors: Ion S. Antoniu, Ion N. Chiuta, Dan D. Gheorghide // Annals: Series on engineering sciences. –2017. – p. 14.